

珠江口红树种植-养殖耦合系统浮游藻类及水质氮磷营养研究*

李 策^{1,2}, 刘 玉¹, 黄少峰¹, 黄齐欣¹, 郑杏雯¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 温州市环境保护设计科学研究院, 浙江 温州 325000)

摘 要: 对珠江口国家 863 计划“滩涂红树林种植-养殖系统耦合示范研究”基地中 3 个系统 12 个红树种植-养殖塘的浮游藻类和氮磷营养盐进行了 1 年内 4 次调查研究。结果表明, 4 种红树植物秋茄、桐花树、木榄、红海榄的单种或组合种植对于 DIN 和 PO₄-P 均有不同程度的净化作用, 但各个塘的浮游藻类均处在富营养化或超富营养化水平。通过对各系统中浮游藻类进行群落等级聚类分析 (CLUSTER) 和非度量多维测度排序 (NMDS) 研究, 说明红树种植可以改变藻类的群落结构, 但红树种植短期内不能降低水体中的藻类丰度和富营养化程度。红树植物和藻类间的复杂内在关系有待更加细致的机理分析与研究。

关键词: 种植-养殖耦合; 红树植物; 浮游藻类; 氮磷营养

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 05-0150-05

Phytoplankton and N and P Nutrients in the Plantation-Aquaculture Coupling System of Mangrove in the Pearl River Estuary

LI Ce^{1,2}, LIU Yu¹, HUANG Shaofeng¹, HUANG Qixin¹, ZHENG Xingwen¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Environment protection design&science research institute of Wenzhou, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Four times of investigation concerning phytoplankton and N- and P nutrients were carried out in twelve plantation-aquaculture coupling ponds of mangrove in the Pearl River estuary. The results showed that single plantation or coupled plantation of four mangrove species *Kandelia cande*, *Aegiceras corniculatum*, *Bruguiera gymnorrhiza*, and *Rhizophora stylosa* could purify DIN and PO₄-P to a certain extent, but algal abundance was still in eutrophication or super-eutrophication status in each pond. Using cluster and NMDS analyses, it was proved that mangrove could change the community structure, but it could not decrease the abundance and eutrophication of the algae in short period. The complex inner-mechanism relationship of mangrove with algae should be studied further.

Key words: plantation-aquaculture coupling; mangrove; phytoplankton; nitrogen and phosphorus

红树林是一类生长在热带及亚热带海岸潮间带的湿地植物, 具有净化水体的功能, 主要表现在促进悬浮物沉降^[1-2]、促进有机污染物降解^[3-5]、吸收重金属和营养盐等的作用^[6-11], 但对藻类的影响及与富营养化的相互关系则很少见有报道。而目前海水养殖过程中产生的废物在引起养殖水体水质

恶化的同时还会引起养殖水体的重富营养化现象, 影响水产品的质量^[12]。如何降低水产养殖过程中产生的水污染和处理养殖废水已经成为沿海水产养殖亟需解决的重要问题。

国家 863 计划项目“滩涂红树林种植-养殖系统耦合示范研究”直接将红树植物种植在养殖

* 收稿日期: 2009-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展 (863) 计划海洋技术领域重点资助项目 (2007AA091703)

作者简介: 李策 (1984 年生), 男, 硕士; 通讯作者: 刘玉; E-mail: eeslyu@mail.sysu.edu.cn

塘内, 目的是通过种植红树植物的净化作用以达到降低养殖水体水质污染和提高水产品品质的双重功效。本文对红树林种植-养殖耦合系统在养殖水产品投放之前各塘水体的 N、P 营养盐及浮游藻类在 1 年内的变化动态进行了综合生态调查, 分析和比较了各种种植塘的藻类状况和不同种红树植物对水质的净化作用和对藻类富营养化作用的影响, 为红树在实践中推广应用提供理论分析依据。

1 材料与方 法

1.1 养殖塘的构建

选取珠江口海上田园风景旅游区东 1 号涌和 2 号涌之间的滩涂湿地, 构建 3 个系统共 12 个种养塘, 各塘的构建情况如表 1, 位置分布如图 1。外供水系统为引入 1 号涌水先经过红树植物预处理后再排入养殖塘, 原位水系统的污水则直接由河涌排入, 这样设置的目的是比较红树植物对不同浓度污水的净化效果。污水排入后便成为独立封闭的系统, 红树种植面积占养殖塘面积的 15%。

表 1 红树林种植-养殖耦合系统构建表
Table 1 Construction of plantation-aquaculture coupling system of mangrove

供水系统	红树种类	面积/hm ²	塘号
A 系统: 秋茄-桐花树 桐花树外供水	秋茄-桐花树	0.80	A1
	桐花树	0.67	A2
	秋茄	1.33	A3
	对照	1.33	A4
B 系统: 秋茄-桐花树 桐花树原位水	秋茄	1.60	B1
	桐花树	1.60	B2
	秋茄-桐花树	2.13	B3
	对照	2.00	B4
C 系统: 木榄-红海榄 红海榄原位水	木榄	1.47	C1
	红海榄	1.67	C2
	木榄-红海榄	1.67	C3
	对照	0.87	C4

1.2 营养盐和浮游藻类的采样和分析

在每塘四角及中心设 5 个采样点, 距水面 0.5 m 处采 1 L 水样, 均匀混合水样进行浮游藻类和营养盐分析。采样时间为 2008 年 6 月 3 日, 9 月 11 日, 11 月 9 日以及 2009 年 1 月 14 日。

鲁哥试液固定和虹吸法浓缩, 用 0.1 mL 的浮游生物计数框进行藻类定量镜检。0.45 μmGF/C 玻璃纤维滤纸过滤水样 250 mL, 90% 丙酮萃取

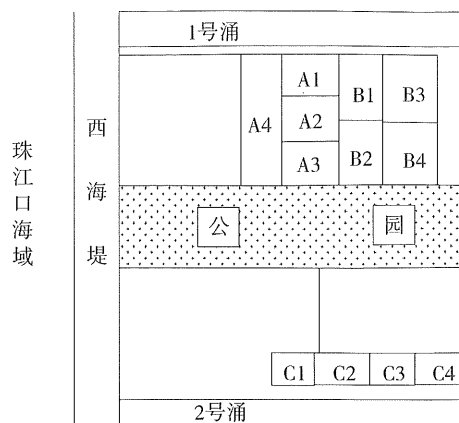


图 1 红树林种植塘位置分布图

Fig. 1 The distribution of plantation-aquaculture ponds

24 h, 用 10-Au 荧光计测定叶绿素 a 含量。滤液用于营养盐的测定, 氨氮采用靛酚蓝分光光度法, 硝态氮镉柱还原法, 亚硝态氮 N-(1-萘基)-乙二胺光度法, 正磷酸盐磷钼蓝分光光度法。

1.3 数据分析

用双因素无重复方差分析 (LSD 多重比较检验) 在 SPSS17.0 中进行。使用 Excel 软件建立“养殖塘-藻类种类”二维矩阵数据库, 导入 Pc-ord 软件进行群落等级聚类分析 (CLUSTER) 和非度量多维测度排序 (NMDS)^[13]。首先是将各个塘的藻类丰度经 4 次方根转化及标准化, 然后在 Bray-Curtis 相似性系数^[14]测量的基础上, 组合使用 CLUSTER 和 NMDS 两种技术。CLUSTER 通常根据不同样本间的相似系数按等级建立树状图, 而 NMDS 根据样本间的相似程度, 在二维平面图上通过距离远近反映出来, 用胁迫系数 (stress) 来判断一个二维 NMDS 的分析结果: stress < 5, 结果极好地表达了群落间的相似性; 5 < stress < 10, 结果较好地表达了群落间的相似性; 10 < stress < 20, 结果表达群落相似性的效果一般; stress > 20, 排序结果不可信。它们在低维空间可以较好的反映相似矩阵的信息^[15], 因而通过这两种技术能更充分地展示各个塘藻类群落结构格局, 进而分析比较各个塘浮游藻类群落结构的相似性。

2 结果与分析

2.1 营养盐

各个塘 4 次调查 DIN 均介于 0.076 ~ 5.66 mg/L 之间 (见图 2)。A2 塘在 2009 年 1 月达到了国家海水水质一类标准。B 系统特别是 B1 和 B2 塘均达到了海水一类标准, 而对照塘 B4 在 2009 年 1 月

反而明显上升, 超出了四类标准。C 系统基本均超出四类标准, 但种植红树的 3 个塘 DIN 浓度随时间呈明显的下降趋势, 4 个塘的 DIN 浓度平均值大小为 $C2 < C3 < C1 < C4$, 经方差分析, 差异达到显著水平 ($p < 0.05$); LSD 检验表明, C2 明显小于 C4 ($p < 0.01$), C3 明显小于 C4 ($p < 0.05$), C2 和 C3 塘在 2009 年 1 月的浓度相比于 2008 年 6 月分别下降了 53.72% 和 59.01%。

磷的变化见图 3, 2008 年 6 月各塘的 $PO_4 - P$ 浓度相对较高, 而 2008 年 9 和 11 月各塘的浓度均在检出限 0.01 mg/L 以下。A 系统 A3 塘的 $PO_4 - P$ 浓度一直维持在较低的浓度, 4 次调查均符合一类标准, 对照塘 A4 在 2009 年 1 月份明显升高, 超出了四类标准。B 系统 3 个红树种植塘从 2008 年 9 月开始浓度一直维持在一类 - 二类标准之间, 但对对照塘 B4 却在 2009 年 1 月份明显升高, 超出四类标准。C 系统的 C2 和 C3 塘对于保持 $PO_4 - P$ 在较低浓度也具有较好的效果, 从 2008 年 9 月开始一直维持在一类 - 二类标准, 而对照塘在 2009 年 1 月却明显上升, 处于二类 - 三类级标准。

2.2 浮游藻类丰度及叶绿素 a 值

浮游藻类丰度介于 $1.34 \times 10^6 \sim 1.43 \times 10^8$ 个/L

之间, 均超过了湖泊富营养化时浮游藻类丰度的阈值 10×10^5 个/L, 表明在目前阶段各红树种植塘的浮游藻类数量仍处在很高的水平。通过计算各个塘 4 次采样的藻类丰度平均值, 可以发现, C2 塘的藻类丰度最低, 但其均值仍高达 9.93×10^6 个/L, 而 B4 塘的藻类丰度最高, 4 次均值为 5.06×10^7 个/L。总体来看, A 系统和 B 系统的 8 个塘藻类丰度相对较高, C 系统 4 个塘藻类丰度相对较低。三系统藻类丰度平均值大小为: $A3 < A4 < A1 < A2$, $B1 < B2 < B3 < B4$, $C2 < C1 < C3 < C4$, 但是经方差分析, 各系统相互之间均未达显著差异水平 ($p > 0.05$)。

叶绿素 a 是反映水体中浮游藻类生物量的一个综合指标。各塘之间叶绿素 a 值的变化较大, 介于 26.52 ~ 664.69 $\mu\text{g/L}$ 之间, 最大值出现在 2009 年 1 月的 A1 塘, 最小值出现在 2009 年 1 月的 C1 塘, 结果如图 5 所示。参照叶绿素 a 的划分标准^[16], 各个塘均处于富营养和重富营养的阶段, 同浮游藻类丰度反映的结果相同, 三系统叶绿素 a 的均值大小为: $A3 < A2 < A4 < A1$, $B2 < B1 < B3 < B4$, $C2 < C1 < C3 < C4$, 但各塘间均为差异不显著 ($p > 0.05$), 只有 C2 塘显著低于 C4 塘 ($p = 0.035 < 0.05$)。

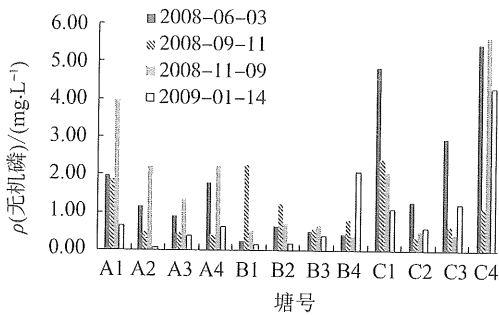


图 2 各种养塘内的 DIN 浓度
Fig. 2 Concentration of DIN in each pond

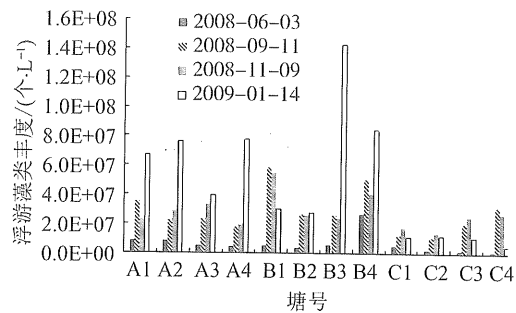


图 4 各种养塘内浮游藻类丰度
Fig. 4 Abundance of algae in each pond

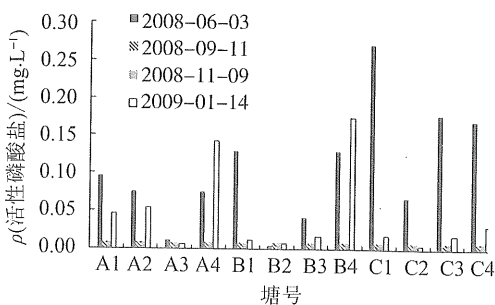


图 3 各种养塘内的 $PO_4 - P$ 浓度
Fig. 3 Concentration of $PO_4 - P$ in each pond

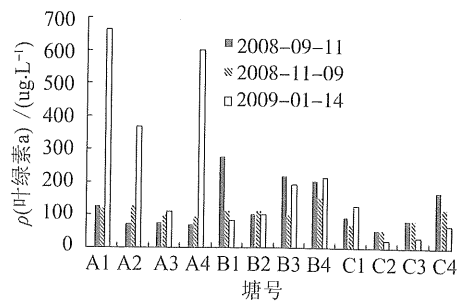


图 5 各种养塘内叶绿素 a 含量
Fig. 5 Concentration of Chla in each pond

2.3 浮游藻类群落结构分布格局分析

利用 Pc-ord 软件进行藻类群落聚类分析和非度量多维测度排序 (NMDS), 得到藻类群落聚类分析树状图和 NMDS 散点图, 如图 6 所示。

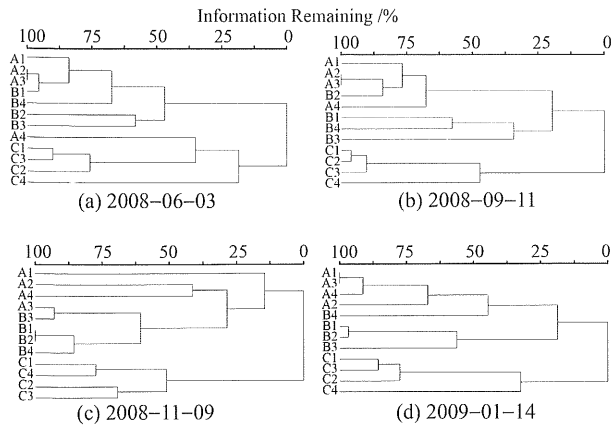


图 6 浮游藻类的 UPGMA 聚类分析树状图

Fig. 6 UPGMA dendrogram of phytoplankton

2008 年 6 月 (见图 6a), 在 15% 左右的相似性水平上, 基于 Bray-Curtis 距离的等级聚类分析将 12 个塘的藻类划分为 2 组: 第一组的 7 个塘均属于秋茄-桐花树系统, 相似性程度达到了 50%。第二组属于木榄-红海榄系统的四个塘。A1、A2、A3、B1、B2、B3 和 B4 种类相对较多, 介于 14~23 种, 都由蓝藻、裸藻、硅藻、绿藻和隐藻门 5 大门类组成且蓝藻门的种类数较多。而 A4 和 C1、C2、C3 和 C4 种类数相对较少, 介于 9~19 种之间, 主要由蓝藻、裸藻、硅藻和绿藻门类组成, 因而相似性较高。

2008 年 9 月 (见图 6b), 同样地也可以分为 2 组: A1~A4、B1~B4 种类相对较多, 因而独立为一组, C1~C4 种类较少的为一组。C 系统 4 个塘能够和 A、B 两系统的藻类组成明显区别开来自成系统, 并且红树种植塘与对照塘组成明显不同, 主要是由于 C4 出现了较多的多污性指示种鱼腥藻 (*Anabaena constricta*) 和 α 中污性指示种梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)。

2008 年 11 月 (见图 6c) 12 个塘也可分为两个组: A、B 两系统的 8 个塘为一组, 种类介于 60~83 种。C 系统的 4 个塘为一组。C 系统的 4 个塘藻类种数以及各门藻类的丰度均较 A、B 系统少, 介于 43~61 种。C 系统的 4 个塘在 50% 左右的相似性水平上可以归为一类。C2 和 C3 主要以 α 中污性指示种卵形隐藻 (*Cryptomonas ovata*) 为优

势, C4 则是以 α 中污性指示种反曲隐藻 (*Campylomonas reflexa*) 为优势, 同时 C4 和 C1 还均有较多的 α 中污性指示种梅尼小环藻。

2009 年 1 月 (见图 6d) 12 个塘同样可以分为 2 个组: A、B 两系统的 8 个塘为一个组, C 系统的 4 个塘为一组。C 系统红树种植的 3 个塘在 75% 左右的相似性水平上聚为一类, 对照塘的浮游藻类组成与这 3 个塘的相似性较低, 其中, C1、C2 和 C3 这三个塘分别以棕鞭藻 sp.1 (*Ochromonas* sp.1) 和单独型并基角毛藻 (*Chaetoceros decipiens* f. *singularis*) 为优势, 而 C4 有较多的小型月牙藻 (*Selenastrum minutum*)。

NMDS 排序分析和聚类分析相互验证。NMDS 序列分析法把样本间复杂的生物相似性关系转变成图上样本点间的距离来表示。如果两样本间生物组成相似, 则代表这两个样本的点在 NMDS 图上的距离就越近, 反之, 距离就越远。对 4 次样品的 NMDS 排序分析结果见图 7, 其结果与等级聚类分析结果基本一致。

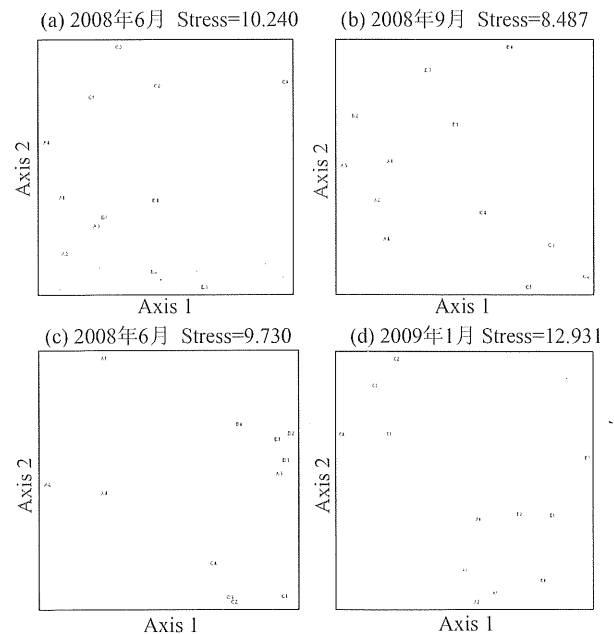


图 7 浮游藻类的 NMDS 散点图

Fig. 7 NMDS ordination graph of phytoplankton

总体来讲, 从浮游藻类群落结构聚类分析和排序表明, 系统构建初始时 A、B 两系统塘的浮游藻类相似性达到了 50%, 从 2008 年 9 月开始, 这两个系统只能达到 15% 的相似性, 表明这两个系统浮游藻类群落结构出现了一定的差异。C 系统的红海榄塘 (C2) 和木榄-红海榄塘 (C3) 浮游藻类群落结构在四次调查期间均同对照塘 (C4) 区别

开来,这可能是由于红树植物的种植改变了浮游藻类的生境,而生境的改变又可能导致浮游藻类群落结构的改变^[17-18]。

3 结 论

红树种植对 DIN 和 PO₄-P 都有不同程度的净化作用,但是从藻类丰度和叶绿素 a 标准判断,各个红树种植塘仍均处于富营养化和重富营养化状态。红树种植可以降低水体中氮和磷的浓度,但即使是较低的氮或磷浓度仍可能是超出了藻类的生长阈值,所以红树种植有可能会改变浮游藻类的群落结构,但红树种植不能控制水体中藻类的生长丰度,也即红树种植不能降低水体的富营养化程度。水生系统中红树植物和藻类间的关系非常复杂,比如,红树植物根的分泌物是否对藻类生长有影响,有待今后更加细致的机理分析与研究。

参考文献:

- [1] FURUKAWA K, WOLANSKI E, MUELLER H. Currents and sediment transport in mangrove forest [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1997, 44(3): 301-310.
- [2] HALIDE H, RIDD P V, PETERSON E L, et al. Assessing sediment removal capacity of vegetated and non-vegetated settling ponds in prawn farms [J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 27(4): 295-314.
- [3] LE T X, MUNEKAGE Y, KATO S. Antibiotic resistance in bacteria from shrimp farming in mangrove areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 349(1-3): 95-105.
- [4] 靖元孝, 李晓菊, 杨丹箐, 等. 红树植物人工湿地对生活污水的净化效果 [J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2365-2373.
- [5] 黄凤莲, 夏北成, 戴欣, 等. 滩涂海水种植-养殖系统细菌生态学研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1030-1034.
- [6] CHU H Y, CHEN N C. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater [J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 38(1): 361-368.
- [7] LIN P, CHEN R H. Role of mangrove in mercury cycling and removal in the Jiulong estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 9(4): 181-186.
- [8] 郑文教, 王文卿, 林鹏. 九龙江口桐花树红树林对重金属的吸收与累积 [J]. *应用与环境生物学报*, 1996, 2(3): 207-213.
- [9] WU Y, CHUNG A, TAM N F Y, et al. Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 34: 137-146.
- [10] GONASAGERAN N. Differential effects of nitrogen and phosphorus enrichment on growth of dwarf *Avicennia marina* mangrove [J]. *Aquatic Botany*, 2009, 90: 184-190.
- [11] WU Y, TAM N F Y, WONG M H. Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 58: 727-734.
- [12] 杨卫华, 高会旺, 张永举. 海水养殖对近岸海域环境影响的研究进展 [J]. *海洋湖沼通报*, 2006, 1: 100-105.
- [13] McCUNE B, MEFFORD M J. Multivariate analysis of ecological data, Version 4. 25 [CP]. Glendon Beach: MjM Software Design, 1999.
- [14] BRAY J R, CURTIS J T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin [J]. *Ecological Monographs*, 1957, 27: 325-349.
- [15] KRUSKAL J B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis [J]. *Psychometrika*, 1964, 29(1): 1-27.
- [16] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 中国湖泊环境: 第一册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [17] SCHELSKE C L, STOERMER E F, CONLEY D J, et al. Early eutrophication in the lower Great Lakes: new evidence from biogenic silica in the sediments [J]. *Science*, 1983, 222: 320-322.
- [18] 陈宇炜, 高锡云, 秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究 [J]. *湖泊科学*, 1998, 10: 35-40.